

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ

К.В. Жданов, М.С. Ерохин, М.Ю. Степкина, А.А. Жирнов, О.Б. Кудряшова

*Исследовано влияние электростатического заряда поверхности диэлектриков на краевой угол смачивания для некоторых жидкостей (вода, глицерин, машинное масло) методом растекающейся капли. Показано, что электрический заряд поверхности всегда приводит к уменьшению краевого угла смачивания, но в некоторых случаях незначительно, а в других (глицерин на эбоните) – существенно. Приведены экспериментальные зависимости краевого угла от уровня заряда поверхности.*

*Ключевые слова: электростатический заряд, краевой угол смачивания, диэлектрики, метод растекающейся капли.*

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие на границе раздела трех фаз (твердой, жидкой и газообразной) интересны как с практической, так и с теоретической точки зрения и изучаются уже десятки лет. Можно отметить обзор Пьера Жилия де Жена [1], книги [2, 3] и др.

На краевой угол смачивания влияет множество факторов: чистота поверхности, шероховатости. Эти факторы могут, как увеличить, так и уменьшить величину краевого угла смачивания. Известно также, что электрический заряд поверхности улучшает смачивание этой поверхности жидкостью, независимо от знака заряда [1–3].

Такое явление может быть вредно – если требуется, чтобы поверхность не смачивалась жидкостью, например, при создании супергидрофобных самоочищающихся покрытий. Но во многих практических задачах, наоборот, требуется улучшить смачивание поверхности, например, в технологических процессах, где необходимо вмешать в жидкость частицы порошка, материал которых не смачивается этой жидкостью (имеет краевой угол смачивания, больше  $90^\circ$  [5]). Улучшение смачиваемости частиц также важно в задачах электростатической очистки поверхностей от загрязнений [6].

Несмотря на то, что явление улучшения смачиваемости при наличии электростатического заряда известно уже давно, в литературе имеется крайне мало данных по экспериментальному измерению краевого угла при электростатической зарядке поверхности твердого тела, смачиваемой жидкостью. Неизвестно, насколько сильно может изменять зарядка поверхности краевой угол.

Настоящая работа стремится преодо-

леть этот пробел. Цель работы – экспериментальное исследование краевого угла смачивания при электростатической зарядке смачиваемой поверхности.

В своем исследовании мы ограничимся практически важной группой низкоэнергетических поверхностей [4] и лишь некоторыми модельными жидкостями.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

На низкоэнергетических поверхностях могут наблюдаться неполное и полное смачивание различными жидкостями.

В соответствии с законом Юнга, краевой угол смачивания определяется выражением:

$$\sigma_{31} = \sigma_{23} + \sigma_{21} \cos(\theta), \quad (1)$$

где  $\sigma_{31}$  – поверхностное натяжение (удельная поверхностная энергия) твердого тела на границе с воздухом,  $\sigma_{23}$  – межфазная энергия на границе твердого тела с жидкостью,  $\sigma_{21}$  – энергия на границе жидкости и газообразной фазы.

Поверхностная энергия твердого тела, стремясь уменьшиться, вызывает растяжение капли по поверхности, таким образом, смачиваемость твердого тела с повышенной поверхностной энергией повышается.

Диэлектрики с удельным электрическим сопротивлением, порядка  $10^8$  Ом·м и более, могут накапливать статическое электричество, тем самым повышая поверхностную энергию. Образование электрических зарядов на поверхности диэлектриков может происходить за счет трения, когда из-за неровностей поверхности диэлектрика и контактирующего с ним материала происходит многократный контакт и разрыв контакта, сопровождающийся электризацией (трибоэлектрический эффект).

Рассмотрим точечный заряд  $q$  в одно-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ

родном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Напряженность электрического поля  $E$  и потенциал  $\phi$ , создаваемого этим зарядом, в  $\epsilon$  раз меньше, чем в вакууме:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2\epsilon_0}, \quad \phi = \frac{q}{4\pi\epsilon r\epsilon_0}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $r$  – расстояние от заряда  $q$ , создающего поле, до точки поля, в которой определяется напряженность.

Определим максимальную величину заряда пластины диэлектрика, которую он может получить при трении:

$$Q_{\max} = \epsilon_0 E_b S,$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $E_b = 3 \cdot 10^6$  В/м – напряженность поля пробоя в воздухе между электродами;  $S$  – площадь поверхности пластины, контактирующая с заряжающим трением материалом. Тогда для  $S = 80$  см<sup>2</sup>  $Q_{\max} \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Кл.

Если заряд распределен по поверхности пластины равномерно, а ее толщина много меньше продольных размеров (принимая пластину за бесконечную плоскость), то напряженность электрического поля с плотностью заряда  $Q/S$ , составит:  $E = \frac{Q}{2\epsilon_0\epsilon S}$ .

Поверхностное натяжение характеризует силу  $F$ , действующую на единицу длины линии трехфазного контакта  $l = 2\pi d$ , где  $d$  – диаметр капли на поверхности пластины. С другой стороны, изменение силы, действующей на линию контакта фаз, связанное с зарядкой поверхности, составит  $\Delta F = EQ = \frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S}$ .

Тогда при накоплении электрических зарядов на поверхности материала (электризации) поверхностное натяжение увеличивается на величину:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{l} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 Sd}. \quad (3)$$

При увеличении заряда поверхности растет поверхностное натяжение диэлектрика (3), а значит, в соответствии с выражением (1), и косинус угла смачивания – смачиваемость поверхности увеличивается.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Краевой угол смачивания измеряется методом растекающейся (равновесной) кап-

ли. Поверхности диэлектриков – максимально гладкие, сухие – для устранения эффектов гистерезиса смачивания и размерных эффектов. Все эксперименты проводились при низкой влажности воздуха в помещении (30–40 %) и при комнатной температуре (22 °С), чтобы исключить влияние этих параметров.

Схема измерительной установки для определения краевого угла смачивания приведена на рисунке 1. На штатив 6 (а) строго горизонтально, с помощью уровня, устанавливается пластина 3 из определенного материала (эбонит, оргстекло). На штатив 6 (б) устанавливается фотоаппарат таким образом, чтобы объектив находился на уровне пластины. При этом нужно подобрать такое расстояние между фотоаппаратом и пластиной, чтобы задняя грань пластины визуально совпадала с передней гранью. Делается это для наименьшего искажения угла.

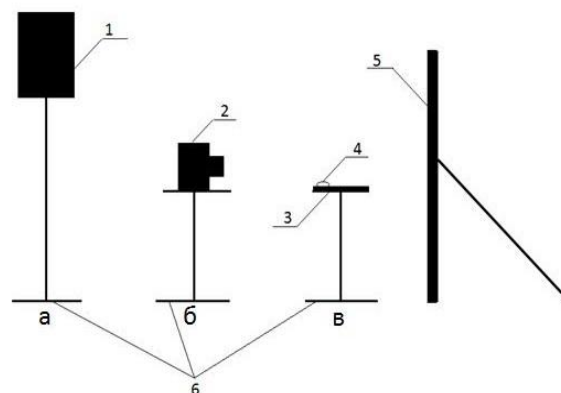


Рисунок 1 – Схема установки для определения краевого угла смачивания с помощью метода растекающейся капли: 1 – осветительный прибор; 2 – фотоаппарат; 3 – пластина из плексигласа (эбонита); 4 – капля исследуемой жидкости (вода, глицерин, моторное масло); 5 – контрастный фон; 6 (а, б, в) – штативы

Необходимо настроить фокус фотоаппарата таким образом, чтобы добиться резкого изображения профиля пластины. После этого включаем осветительный прибор 1. С помощью шприца наносим исследуемую жидкость на поверхность пластины у самого ее края, обращенного в сторону объектива. После растекания капли (по истечении, приблизительно, 15 с) по поверхности пластины производим съемку капли. На полученной фотографии производим измерение угла (рисунок 2).

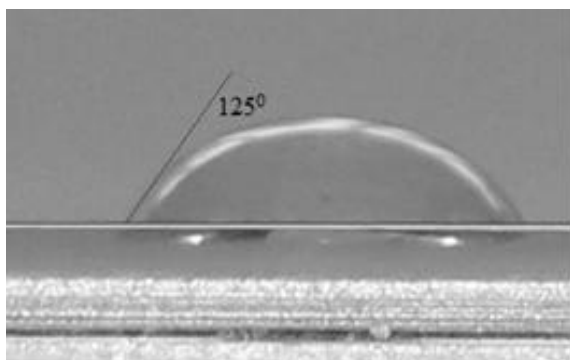


Рисунок 2 – результат компьютерной обработки полученных фотографий

Первая серия экспериментов связана с фиксированием влияния на смачиваемость электростатической зарядки поверхности, без измерения уровня и знака заряда. Для определения зарядки поверхности использовался электроскоп. В качестве диэлектриков взяты эбонит и полиметилметакрилат (оргстекло), в качестве модельных жидкостей – вода, глицерин, машинное масло, отличающиеся различными величинами поверхностного натяжения и краевого угла смачивания. Во второй серии экспериментов проводилось измерение величины заряда поверхности для пары вода-оргстекло и глицерин-оргстекло.

На рисунке 3 приведена схема измерительной установки для измерения величины электростатического заряда поверхности диэлектрика. Образец диэлектрика на схеме обозначен ВВ'. В дальнейшем пластинка диэлектрика заряжается статическим электричеством с потенциалом, измеряемым вольтметром. Щуп вольтметра подносят на расстояние  $x$  к центру пластины (точка А). Изначально ключ в цепи 1 замкнут, для того, чтобы поверхности сообщался нулевой заряд с земли; после зарядки поверхности образца статическим электричеством (трением) ключ в цепи 1 размыкают. Для получения значений величин разности потенциалов  $\varphi$  использовался мультиметр цифровой АРРА 103N.

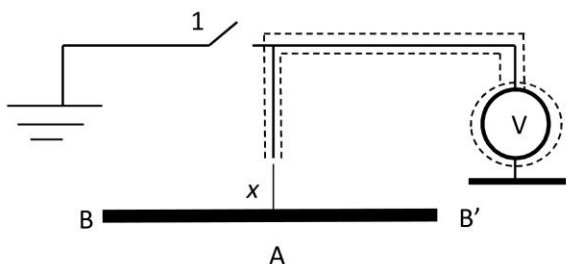


Рисунок 3 – Блок схема установки для определения электростатического заряда поверхности

Показания вольтметра дают нам потенциал образованного электрического поля. При условии, что поле между пластиной и щупом вольтметра однородно, напряженность поля определяется выражением:

$$E = \frac{\varphi}{x}, \quad (4)$$

электростатический заряд поверхности:

$$Q = \varepsilon_0 ES = \frac{\varepsilon_0 \varphi S}{x}. \quad (5)$$

Учитывая выражения (1) и (3) получим связь между изменением косинуса угла смачивания для капли диаметра  $d$  и потенциалом поля, измеренного на расстоянии  $x$  от пластины площадью  $S$ :

$$\Delta \cos \theta = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{21}} = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\sigma_{21}Sd} = \frac{\varepsilon_0 S \varphi^2}{4\pi\varepsilon\sigma_{21}dx^2}. \quad (6)$$

Экспериментально измеренное изменение краевого угла при зарядке поверхности  $\Delta \cos \theta$  свидетельствует о наличии заряда поверхности пластинки величины:

$$Q = \sqrt{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\sigma_{21}Sd\Delta \cos \theta}. \quad (7)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены результаты измерений краевого угла в первой серии экспериментов.

На рисунке 4 показана зависимость изменения косинуса угла смачивания от заряда поверхности, рассчитанного по формуле (7), исходя из полученных экспериментальных данных. Буквенные подписи точек соответствуют первым буквам материала жидкости и твердой подложки.

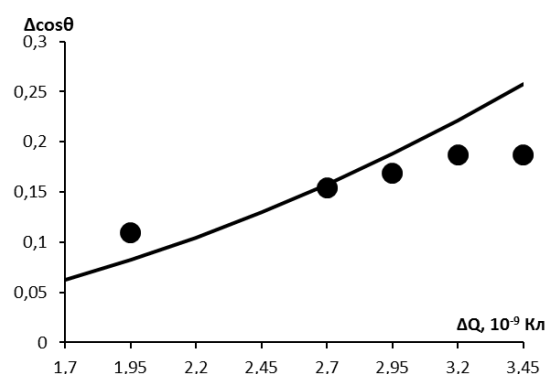
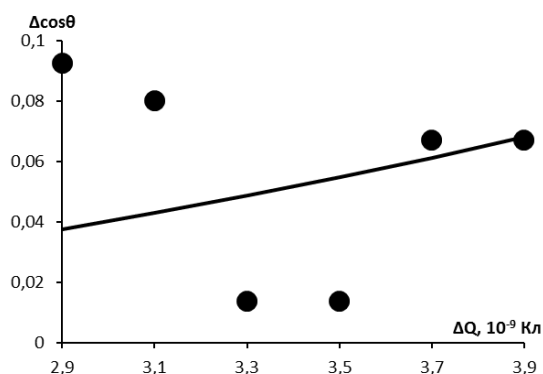
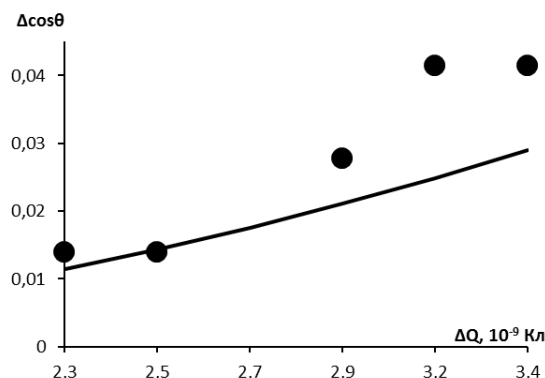
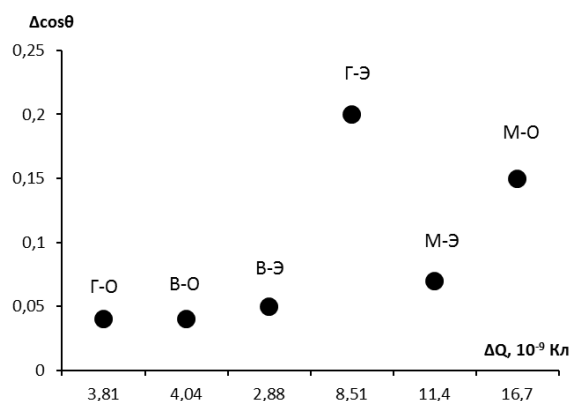
Наибольшее изменение угла смачивания продемонстрировал глицерин на подложке из эбонита и машинное масло на оргстекле. Меньше всего изменилось смачивание поверхности в связи с ее зарядом у глицерина и воды на подложки из оргстекла.

В следующей серии экспериментов проводились измерения величины краевого угла вместе с измерением величины потенциала электрического поля и заряда поверхности в соответствии с формулой (5). Рассчитывалась величина краевого угла, которая соответствует измеренному заряду – по формуле (6). Результат приведен на рисунке 5 для пары глицерин-оргстекло, на рисунке 6 для пары вода-оргстекло, на рисунке 7 для пары масло-оргстекло.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ

Таблица 1 – Результаты измерений краевого угла смачивания в присутствии и в отсутствии заряда поверхности для различных пар веществ

Жидкость	Подложка	Заряд	Средний угол, °
Вода	Оргстекло	Присутствует	51±6,0
		Отсутствует	54±3,7
	Эбонит	Присутствует	39±2,5
		Отсутствует	43±5,0
Глицерин	Оргстекло	Присутствует	51±5,0
		Отсутствует	54±4,9
	Эбонит	Присутствует	57±4,2
		Отсутствует	70±3,9
Машинное мас- ло	Оргстекло	Присутствует	11±1,0
		Отсутствует	34±1,2
	Эбонит	Присутствует	11±5,0
		Отсутствует	25±4,7



Наибольшее изменение угла смачивания демонстрирует машинное масло на подложке из оргстекла. При этом наблюдается также наименьший разброс экспериментальных данных. С другой стороны, масло и в отсутствие заряда поверхности хорошо смачивает оргстекло, а зарядка поверхности еще увеличивает этот эффект.

Даже небольшое изменение косинуса краевого угла приводит к ускорению капиллярного проникновения в задачах фильтрации и пропитки, очистки поверхностей. Формула (6) позволяет оценить это изменение. Как видно из приведенных рисунков, расчет удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе проведено экспериментальное исследование краевого угла смачивания при электростатической зарядке смачиваемой поверхности диэлектриков (эбонит и оргстекло) для модельных жидкостей (вода, глицерин, машинное масло). Обнаружен эффект повышения смачивания поверхности с зарядом этой поверхности, получена расчетная формула (6), позволяющая оценить увеличение косинуса угла смачивания в зависимости от величины заряда поверхности, поверхностного натяжения жидкости и диэлектрической проницаемости вещества.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол\_a 16-38-00581).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де Жен, П. Ж. Смачивание: статика и динамика / П. Ж. де Жен // УФН. – 1987. – № 151. – С. 619–681.
2. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
3. Русанов, А. И. Современная теория капиллярности: к 100-летию теории капиллярности Гиббса / А. И. Русанов, Ф. Ч. Гудрич. – Л.: Химия, 1980. – 344 с.
4. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

5. Kudryashova, O. On the Mechanism of Ultrasound-Driven Deagglomeration of Nanoparticle Agglomerates in Aluminum Melt / O. Kudryashova, S. Vorozhtsov // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM). – 2016. – Vol. 68, № 5. – P. 1307–1311. – DOI 10.1007/s11837-016-1851-z.

6. Степкина, М. Ю. Использование электрического поля для очистки поверхностей / М. Ю. Степкина, О. Б. Кудряшова, Е. В. Муравлев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 4, Т. 2. – С. 95–99.

**Жданов Константин Владимирович**, студент инженерного спецфакультета Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова), e-mail: kossjdn@mail.ru, тел.: (3854) 43-22-85, факс: (3854) 43-53-00.

**Ерохин Михаил Сергеевич**, студент инженерного спецфакультета БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: eromss@yandex.ru, тел.: (3854) 43-22-85, факс: (3854) 43-53-00.

**Степкина Мария Юрьевна**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: tabric@mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.

**Жирнов Анатолий Алексеевич**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН, e-mail: toluol\_88@mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.

**Кудряшова Ольга Борисовна**, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, ИПХЭТ СО РАН, e-mail: olgakudr@inbox.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.